

Научная статья

УДК 621.791.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>



А.Д. Микуленко  , Е.В. Панченко,
М.А. Ожегов, А.А. Наумов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 mikulenko02@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию распределения температурных полей при точечной сварке трением с перемешиванием (ТСТП) алюминиевых листов толщиной 2 мм из АМг5 и В95АТ при помощи компьютерного моделирования. Модель создавалась в программном комплексе для моделирования процессов обработки металлов давлением DEFORM-2D/3D. В результате работы была создана модель процесса ТСТП для алюминиевых сплавов АМг5 и В95АТ, которая была верифицирована по экспериментальным данным измерения температур с помощью термопар. С помощью верифицированной модели было исследовано влияние параметров процесса на температурные поля алюминиевых сплавов. Результаты исследования показали, что основное влияние на повышение температуры при ТСТП оказывает скорость вращения инструмента, а также теплопроводность самого материала. Усложнение геометрии заплечика, в частности нанесение резьбы, дополнительно увеличивает тепловыделение и скачкообразное поведение температуры.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, точечная сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, АМг5, В95АТ1, термоциклы, температурное поле, DEFORM-3D.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Исследование напряженно-деформированного состояния материала при точечной сварке трением с перемешиванием с помощью программно-математического аппарата конечноэлементного 3D-моделирования» (Соглашение №23-29-00842, <https://rscf.ru/project/23-29-00842/>).

Для цитирования:

Микуленко А.Д., Панченко Е.В., Ожегов М.А., Наумов А.А. Аддитивное производство полимерных функциональных ячеистых структур с эффектом памяти формы с использованием FDM-технологии // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>

A.D. Mikulenko ✉, E.V. Panchenko,
M.A. Ozhegov, A.A. Naumov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ mikulenko02@mail.ru

RESEARCH AND MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD DURING FRICTION STIR SPOT WELDING OF SHEET ALUMINUM ALLOYS

Abstract. This work is devoted to the study of the distribution of temperature fields during friction stir spot welding (FSSW) of 2 mm thick aluminum sheets made of Al5Mg and V95AT using computer modeling. The model was created in the DEFORM-2D/3D software package for modeling metal forming processes. As a result of the work, a FSSW process model was created for aluminum alloys Al5Mg and V95AT, which was verified using experimental temperature measurement data using thermocouples. Using a verified model, the influence of process parameters on the temperature fields of aluminum alloys was studied. The results of the study showed that the main influence on the temperature increase during FSSW is the rotation speed of the tool, as well as the thermal conductivity of the material itself. The complication of the shoulder geometry, in particular the application of threads, additionally increases heat generation and the abrupt behavior of the temperature.

Keywords: computer modeling, friction stir spot welding, aluminum alloys, Al5Mg, V95AT1, thermal cycles, temperature field, DEFORM-3D.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00842 “Study of the stress-strain state of the material during friction stir spot welding using the software and mathematical apparatus of finite element 3D modeling”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-29-00842/>.

Citation:

A.D. Mikulenko, E.V. Panchenko, M.A. Ozhegov, A.A. Naumov, Research and modeling of the temperature field during friction stir spot welding of sheet aluminum alloys, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 52–63, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>

Введение. Проблемы при сварке некоторых видов металлов и сплавов приводят к появлению новых технологий соединения. На данный момент перспективным и вызывающим интерес для изучения является процесс сварки трением с перемешиванием (СТП), в том числе процесс точечной сварки трением с перемешиванием (ТСТП).

СТП – это недавно появившаяся технология соединения в твердом состоянии, запатентованная британским институтом сварки (The Welding Institute, TWI) в 1991 году [1]. Впоследствии этот процесс сварки был использован для соединения магниевых [2], титановых [3] и медных сплавов [4], нержавеющей стали [5], сталей [6] и термопластов [7]. Суть данного вида сварки состоит в том, что материалы путем воздействия нерасходуемого вращающегося инструмента на заготовку соединяются не в жидкой фазе (расплавленном металле), а нагреваются за счет сил трения и работы деформации до температур 0,5–0,9 от температуры плавления, тем самым доводятся до пластичного состояния, перемешиваются и при остывании образуют сварное соединение [8].

СТП широко используется в различных областях промышленности для соединения металлов и сплавов, плохо поддающихся традиционным видам сварки [9]. Данный процесс применяют в основном для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления,

прежде всего алюминиевых сплавов. Помимо шовной ТСП достаточное распространение получило нахлесточное соединение ТСП деталей из сплавов цветных металлов на основе алюминия и меди. Данная технология хорошо зарекомендовала себя в автомобильной промышленности и имеет перспективы развития и в других областях применения [10].

В автомобилестроении одним из распространенных материалов является алюминиевый сплав АМг5, который обладает высокой прочностью, пластичностью и устойчивостью к коррозии [4].

Также интересно изучение ТСП термоупрочненных алюминиевых сплавов, таких как В95АТ, Д16АТ1 и АД35Т1, которые имеют широкое применение в аэрокосмической, автомобильной и судостроительной промышленности и отличаются своими высокими прочностными характеристиками. Основной задачей является получение качественного сварного соединения за счет подбора необходимых параметров процесса ТСП.

Несмотря на кажущуюся простоту, процесс ТСП в действительности сложен. В нем взаимодействуют различные физические явления, контролировать которые можно только подбором параметров ТСП. Однако, поскольку технология еще недостаточно изучена, для этого приходится проводить множество экспериментов, что отнимает время и экономические ресурсы. Поэтому рационально создать численную модель, которая может решить данную проблему. Математическое моделирование в сочетании с другими видами исследований позволяет получить картину физико-механических процессов, протекающих в процессе сварки этого вида. Одной из основных тем исследований в ТСП является оценка температурного поля [11].

Цель работы – определение влияния параметров процесса ТСП на температурные поля в алюминиевых сплавах В95АТ и АМг5 при ТСП с помощью компьютерного моделирования.

Материалы и методика

В данном исследовании использовался термоупрочненный алюминиевый сплав В95АТ1, который плохо соединяется обычными видами сварки. Также был использован один из самых распространенных сплавов алюминия в автомобилестроении – АМг5. Химический состав и механические свойства данных сплавов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав и прочностные характеристики алюминиевых сплавов

Table 1

Chemical composition and strength characteristics of aluminum alloys

Сплав	Содержание химических элементов, масс %								σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti			
АМг5	4,8	0,24	0,25	0,06	0,44	0,03	0,09	0,04	325	167	17
В95АТ1	2,8	0,1	0,15	1,77	0,27	0,12	6,12	0,05	555	502	7

Перед моделированием ТСП был проведен сам процесс ТСП алюминиевых сплавов АМг5 и В95АТ на установке Mates 40P со снятием термоциклов с помощью термопар. Листы имели размер 100 × 100 × 2 мм и соединялись внахлест. Термопары были приварены на расстояниях 15 и 20 мм от центра введения инструмента.

Данные режимов процесса и тип инструмента приведены в табл. 2.

Для последующего моделирования в программе DEFORM-2D/3D для сплавов В95АТ и АМг5 была выбрана реологическая модель Джонсона–Кука (1), параметры которой для каждого материала представлены в табл. 3. После анализа литературных источников наиболее подходящей оказалась именно эта модель [12]. Она была выбрана также потому, что параметры этой модели известны для многих материалов [13].

Таблица 2

Режимы ТСТП

Table 2

FSSW modes

Материал	Вращение инструмента	Усилие сварки, кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Длина наконечника, мм	Время выдержки, с
АМг5	2000	4	50	2,7	10
	4000	4	85	2,7	10
	8000	4	150	2,7	10
В95АТ1	2000	4	95	2,7	10
	4000	4	95	2,7	10
	8000	4	150	2,7	10

$$\bar{\sigma} = \left[A + B\bar{\epsilon}^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]. \quad (1)$$

Таблица 3

Параметры модели Джонсона–Кука

Table 3

Johnson–Cook model parameters

Параметр	Материал	
	АМг5	В95АТ
A	218,3	520
B	704,6	420
C	0,001	0,001
n	0,62	0,52
m	0,93	1,61
T _R	20	20
T _M	620	620

Первым шагом было создание геометрических моделей инструментов в программе Solid Works, которые в дальнейшем будут использоваться при моделировании в DEFORM-3D. Инструменты состояли из наконечника и заплечика, без основной части инструмента, это значительно упрощает расчеты, уменьшая время решения одной задачи. Было выбрано три вида различных инструментов:

- 1) основной инструмент, используемый в физическом эксперименте, с плоским заплечиком с диаметром 12 мм и цилиндрическим наконечником диаметром 5 мм и длиной 2,7 мм (рис. 1а);
- 2) инструмент с увеличенным заплечиком с диаметром 16 мм (рис. 1б);
- 3) инструмент с измененной геометрией заплечика (резьбовая поверхность) с диаметром 16 мм (рис. 1в).

Различные виды инструментов были выбраны для того, чтобы проанализировать влияние геометрии инструмента на температурные поля.

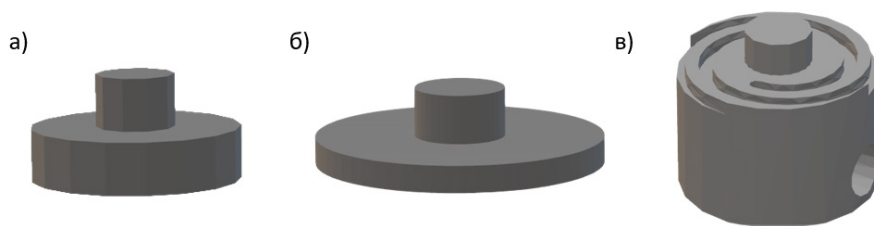


Рис. 1. Геометрия инструментов

Fig. 1. Tool geometry

Геометрия соединяемых пластин в последующих расчетах также была упрощена, две пластины были объединены в одну, а для рационализации времени и точности их размеры были уменьшены с 100×100 мм до 50×50 мм. Толщина каждого листа составляла 2 мм, толщина объединенной пластины – 4 мм. Размер опорной пластины – $200 \times 15 \times 15$ мм.

Следующий шаг заключался в выборе материалов и их свойств в программе для моделирования DEFORM-3D. Материалы подбирались из стандартной базы данных программы. Для B95AT и AMg5 были выбраны зарубежные аналоги Al7075-T6 и DIN-AlMg-Mn соответственно. Чтобы расчеты были более точными, при выборе материала, в том числе реологических свойств, следует учитывать, что при процессе ТСТП сплавы будут подвергаться большим пластическим деформациям при высоких скоростях деформации при повышенных температурах. В данной работе диапазон перечисленных параметров составил: $\epsilon = 0-5$, $\dot{\epsilon} = 0-100000 \text{ c}^{-1}$ в температурном интервале $20-650 \text{ C}^\circ$.

Инструмент моделировался как абсолютно жесткое тело, что вполне оправдано, ведь его прочность и твердость намного больше, чем у алюминиевых сплавов. Сетка была разбита на 30000 элементов, что вполне достаточно для детального анализа распределения температуры в соединяемых деталях.

Соединяемые детали определялись как пластичное тело. Однако следует отметить, что такое допущение в модели материала исключает возможность получения остаточных напряжений в заготовке после движения инструмента; как известно, для получения конечного остаточного напряженного состояния в обрабатываемом материале необходимо использовать упруго-пластическую модель материала. В моделировании ТСТП такая возможность не использовалась, поскольку численное моделирование становится нестабильным, с несколькими проблемами сходимости и бессмысленным временем работы процессора. Высокая нелинейность обусловлена частым перестроением сетки, т. е. переносом данных со старой деформированной сетки на новую недеформированную сетку. Заготовка была разбита на 39000 тетрагональных элементов с минимальной длиной ребра элемента 0,7 мм, также было создано «окно плотности сетки» в месте контакта инструмента и пластин для более точных расчетов. Важно было определить основные параметры движения инструмента, а именно: скорости погружения, скорости вращения и времени выдержки. Данные параметров экспериментов представлены в табл. 2.

Граничные условия задавали следующим образом:

- 1) боковые и нижняя грани пластин были жестко закреплены для предотвращения смещения при взаимодействии с инструментом;
- 2) задан контакт между заготовкой и инструментом с коэффициентом теплообмена, равным $5 \text{ H}/(\text{мм} \cdot \text{c} \cdot \text{C}^\circ)$;
- 3) задан контакт между заготовкой и опорной пластиной с коэффициентом теплообмена, равным $1 \text{ H}/(\text{мм} \cdot \text{c} \cdot \text{C}^\circ)$;

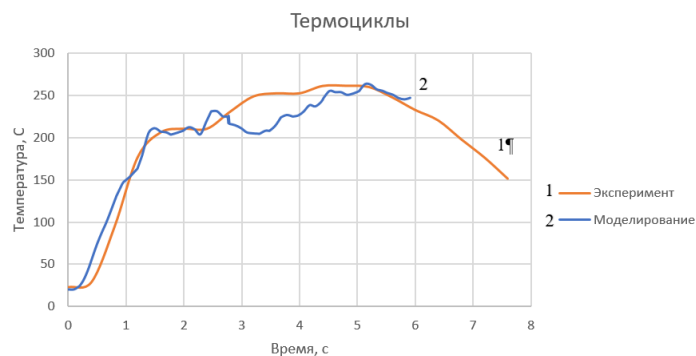


Рис. 2. Графики зависимости температуры от времени АМг5 экспериментально полученной кривой (1) и кривой, полученной при моделировании (2)

Fig. 2. Graphs of temperature versus time Al5Mg of the experimentally obtained curve (1) and the curve obtained by modeling (2)

4) вся поверхность обрабатываемого металла контактировала с окружающей средой, коэффициент конвективного теплообмена задан $20 \text{ Н} / (\text{мм} \cdot \text{с} \cdot \text{С}^\circ)$.

Один из важных шагов при моделировании процесса ТСТП – выбор параметра (показателя) трения. В данном исследовании была выбрана модель трения по Зибелю [14]: $f_k = mk$, где f_k – напряжение трения, МПа; k – предел текучести материала, МПа; m – фактор трения, принят равным 0,7.

Результаты и обсуждение

Первоначально был проведен расчет процесса ТСТП с пластинами АМг5 со скоростью вращения 4000 об/мин с реальными размерами $100 \times 100 \times 2 \text{ мм}$ и $100 \times 100 \times 2 \text{ мм}$, т. е. пластины моделировались как два отдельных тела. Были получены хорошие результаты, однако сам процесс расчета длился более 24 часов, а также останавливался, из-за чего приходилось перезапускать задачу. Поэтому было решено упростить геометрию пластин, сетку и решатель. Сравнение термоциклов снятых экспериментально и рассчитанных в той же точке, что и при эксперименте, представлено на рис. 2. Падение температуры на 3-й секунде связано с малой мощностью программы для расчета данного процесса. Это еще одна из причин изменения параметров процесса.

Однако поведение температуры и ее значения до погружения во вторую пластину являются практически идентичными. Поэтому было решено продолжать моделирование с теми же данными контактных взаимодействий, сетки, граничных условий и свойств материалов.

Ниже представлены результаты моделирования процесса ТСТП алюминиевого сплава АМг5 при скоростях вращения 2000, 4000 и 8000 об/мин с упрощенной геометрией, сеткой и решателем (рис. 3, графики слева) и экспериментальные значения температур, снятых с термопар (рис. 3, графики справа).

Анализируя данные графики термоциклов, можно сделать вывод, что температуры модели достигают тех же значений, что при эксперименте с небольшим отклонением. Характер температурных кривых схож, однако на графике слева мы можем видеть резкий скачок температуры, который связан с началом погружения заплечика в материал. Также полученные кривые при моделировании имеют скачкообразный характер при высоких температурах, это связано с недостаточно точной сеткой, а также высокая нелинейность обусловлена частым перестроением сетки, т. е. переносом данных со старой деформированной сетки на новую недеформированную сетку.

Ниже представлены результаты моделирования процесса ТСТП алюминиевого сплава В95АТ при скоростях вращения 2000 и 4000 об/мин с упрощенной геометрией, сеткой и решателем

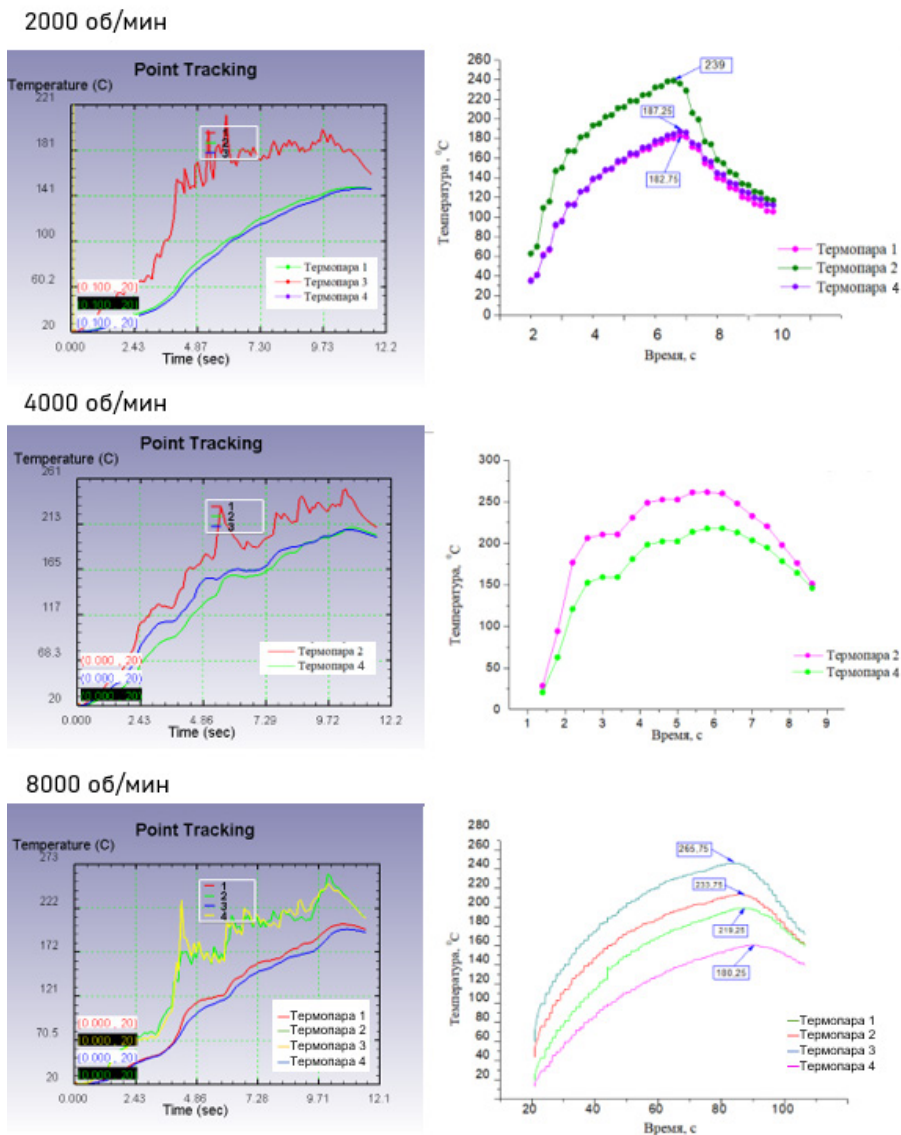


Рис. 3. Зависимость температуры от времени сплава АМг5 при ТСТП, слева – модель, справа – экспериментальные данные

Fig. 3. Dependence of temperature on time of the Al5Mg alloy at FSSW, on the left is the model; on the right is the experimental data

(рис. 4, графики слева) и экспериментальные значения температур, снятых с термопар (рис. 4, графики справа).

Если сравнивать экспериментальные температурные кривые процесса ТСТП АМг5 и В95АТ1, можно увидеть, что у сплава В95АТ1 температуры принимают значения ниже, что мы также можем наблюдать на графике, полученном после моделирования. Основное влияние на снижение температуры оказывает значение теплопроводности, которое у В95АТ1 значительно выше по сравнению с АМг5 [15].

Проанализировав графики сплавов В95АТ и АМг5, можно сделать вывод, что основное влияние на значение температуры оказывает скорость вращения инструмента и теплопроводность сплава. Наибольший рост температуры происходит при погружении заплечика в материал, после этого температура меняется незначительно.

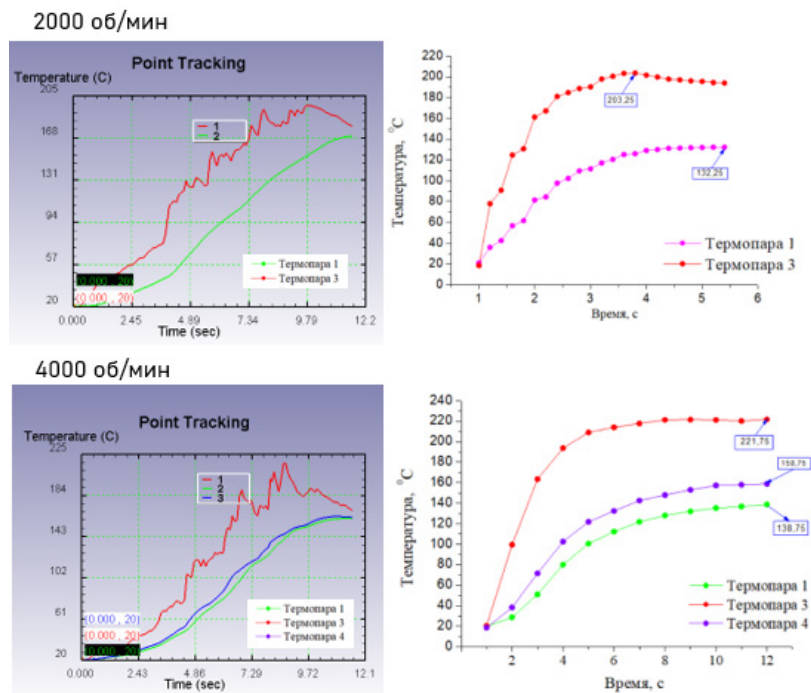


Рис. 4. Зависимость температуры от времени сплава V95AT при ТСТП, слева – модель, справа – экспериментальные данные

Fig. 4. Dependence of temperature on time of the V95AT alloy at FSSW, on the left is the model; on the right is the experimental data

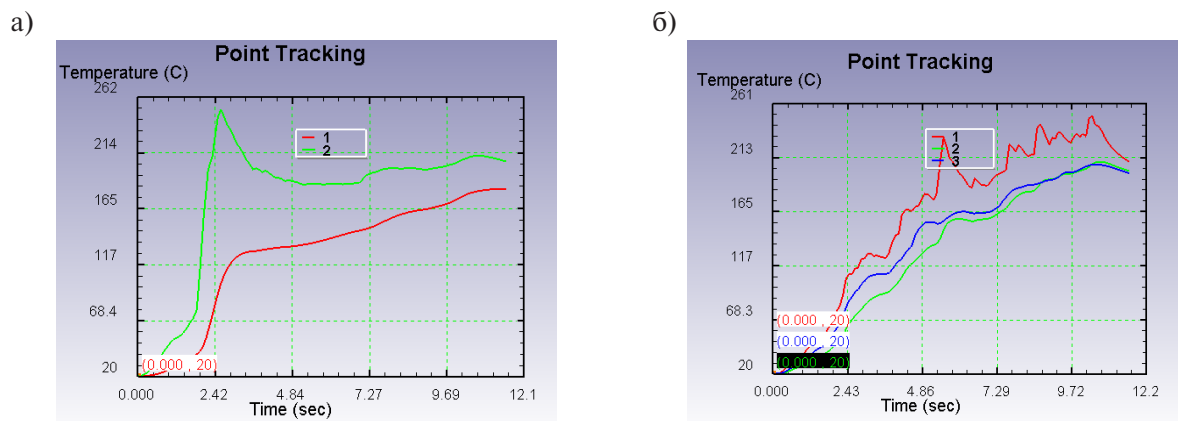


Рис. 5. Зависимость температуры от времени сплава АМг5 при скорости вращения инструмента 4000 об/мин с увеличенным (а) и стандартным (б) заплечиком. Данные после моделирования

Fig. 5. Temperature versus time dependence of the Al5Mg alloy at a tool rotation speed of 4000 rpm with enlarged (a) and standard (b) shoulder. Data after simulation

Также интересно было установить зависимость температурного поля от геометрии инструмента. Для этого был выбран заплечик с большим диаметром, равным 16 мм. Результаты термоциклов представлены на рис. 5.

Максимальная температура в испытании с увеличенным заплечиком стала выше по сравнению со стандартным заплечиком, что логично, так как основной вклад в нагрев материала при

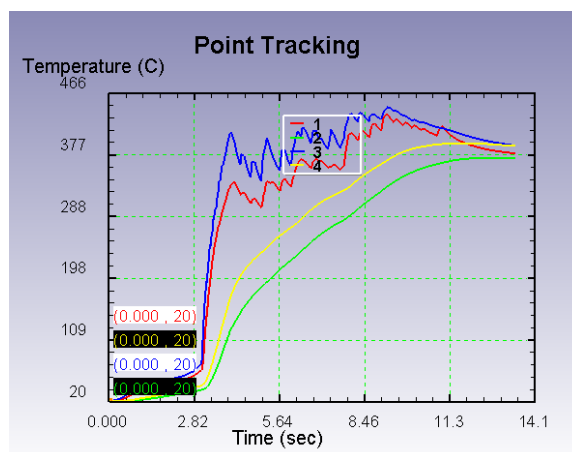


Рис. 6. Зависимость температуры от времени сплава АМг5 при скорости вращения инструмента 4000 об/мин с увеличенным заплечиком с резьбой. Данные после моделирования

Fig. 6. Temperature versus time dependence of Al5Mg alloy at a tool rotation speed of 4000 rpm with an enlarged threaded shoulder. Data after simulation

ТСТП оказывает заплечик. Также поменялся характер кривой — скачок во время погружения заплечика значительно увеличился. Быстрый нагрев металла может отрицательно повлиять на структуру металла и качество соединения. Также большой градиент температур может вызвать нежелательные деформации и напряжения.

При использовании заплечика с резьбой температура увеличилась еще сильнее (рис. 6). Диаметр заплечика совпадал с диаметром увеличенного заплечика (16 мм). Характер кривых схож у инструментов с увеличенным заплечиком, однако температура у заплечика с резьбой увеличилась сильнее.

Заключение

В ходе данной работы была создана универсальная трехмерная модель процесса ТСТП алюминиевых сплавов В95АТ1 и АМг5 с размерами $100 \times 100 \times 2$ мм с использованием инструментов с разной геометрией. Преимуществом модели является возможность прогнозирования термопрочных и нетермоупрочняемых сплавов алюминия. Данная модель является верифицированной по температуре и оптимизирована с точки зрения временных затрат и точности расчета.

Результаты исследования влияния параметров точечной сварки трением с перемешиванием позволяют заключить следующее:

1. Основное влияние на повышение температуры при ТСТП оказывает скорость вращения инструмента, а также теплопроводность самого материала. При увеличении скорости вращения температура повышается. При увеличении теплопроводности материала температура уменьшается, также уменьшается и градиент температур.

2. Показано влияние геометрии на температурные поля. Усложнение геометрии заплечика, в частности нанесение резьбы, дополнительно увеличивает тепловыделение и скачкообразное поведение температуры, что в дальнейшем может отрицательно сказаться на качестве соединения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Thomas W.M., Nicholas E.D. Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design*, 18 (4–6) (1997) 269–273. DOI: 10.1016/S0261-3069(97)00062-9

- [2] **Thoppul S.D., Gibson R.F.** Mechanical characterization of spot friction stir welding joints in aluminum alloys by combined experimental/ numerical approaches: Part I: Micromechanical studies, *Materials Characterization*, 60 (11) (2009) 1342–1351. DOI: 10.1016/j.matchar.2009.06.011
- [3] **Котлышев Р.Р.** Механизм образования соединения и особенности технологии сварки алюминиевых сплавов трением с перемешиванием. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. 22 с.
- [4] **Chowdhury S.M., Chen D.L., Bhole S.D., Cao X.** Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [5] **Мальцев М.В.** Металлография промышленных цветных металлов и сплавов: 2-е изд. М.: Изд-во «Металлургия», 1970. 364 с.
- [6] **Schmidt H.B., Hattel J.H.** Thermal modelling of friction stir welding. *Scripta Materialia*, 58(5) (2008) 332–337. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.008
- [7] **He A., Xie G., Zhang H., Wang X.** A comparative study on Johnson–Cook, modified Johnson–Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel, *Materials & Design* (1980–2015), 52 (2013) 677–685. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.010
- [8] **Бредников М.А.** Определение реологических свойств алюминиевых сплавов АМг5 и Д16 при высоких скоростях нагружения для математического моделирования сварки трением с перемешиванием: магистерская диссертация: 22.04.01. СПб., 2017. 104 с. Библиогр.: С. 102–104. DOI: 10.18720/SPBPU/2/v17-3364
- [9] **Барсуков В.Г. и др.** Сравнительный анализ моделей взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сб. статей международной научно-технической конференции. Брест: БрГТУ, 2023. С. 65–69.
- [10] **Микуленко А.Д.** Моделирование процесса точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: выпускная квалификационная работа бакалавра: 22.03.01. СПб., 2024. 58 с. Библиогр.: С. 56–58. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2024/vr/vr24-5244
- [11] **Chowdhury S.M., Chen D.L., Bhole S.D., Cao X.** Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527(21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [11] **Knipling K.E., Fonda R.W.** Texture development in the stir zone of near- α titanium friction stir welds, *Scripta Materialia*, 60 (12) (2009) 1097–1110. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.02.050
- [12] **Meran C.** The joint properties of brass plates by friction stir welding, *Materials & Design*, 27 (9) (2006) 719–726. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.006
- [13] **Zhu X.K., Chao J.Y.** Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2) (2004) 263–272. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.025
- [14] **Chung Y.D., Fujii H., Ueji R., Tsuji N.** Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility, *Scripta Materialia*, 63 (2) (2010) 223–226. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.03.060
- [15] **Kiss Z., Czigány T.** Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene, *eXPRESS Polymer Letters*, 6 (1) (2012) 54–62. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.6

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИКУЛЕНКО Анастасия Дмитриевна – лаборант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: mikulenko02@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6178-1179>

ПАНЧЕНКО Евгений Владиславович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: panchenko.ev@edu.spbstu.ru

ОЖЕГОВ Михаил Андреевич – старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: ozhmik@yandex.ru

НАУМОВ Антон Алексеевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: anton.naumov@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4934-0415>

REFERENCES

- [1] **W.M. Thomas, E.D. Nicholas**, Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design*, 18 (4–6) (1997) 269–273. DOI: 10.1016/S0261-3069(97)00062-9
- [2] **S.D. Thoppul, R.F. Gibson**, Mechanical characterization of spot friction stir welding joints in aluminum alloys by combined experimental/ numerical approaches: Part I: Micromechanical studies, *Materials Characterization*, 60 (11) (2009) 1342–1351. DOI: 10.1016/j.matchar.2009.06.011
- [3] **R.R. Kotlyshev**, Механизм образования соединений и особенности технологии сварки алюминиевых сплавов трением с перемешиванием. Дис. канд. техн. наук [Mechanism of joint formation and features of friction stir welding technology of aluminum alloys. Cand. Tech. sci. diss.], DGTU, Rostov-na-Donu, 2010.
- [4] **S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao**, Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [5] **M.V. Mal'tsev**, Metallografiya promyshlennykh tsvetnykh metallov i spлавov [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys], 2nd ed., Izd-vo “Metallurgiya”, Moscow, 1970.
- [6] **H.B. Schmidt, J.H. Hattel**, Thermal modelling of friction stir welding. *Scripta Materialia*, 58 (5) (2008) 332–337. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.008
- [7] **A. He, G. Xie, H. Zhang, X. Wang**, A comparative study on Johnson–Cook, modified Johnson–Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel, *Materials & Design* (1980–2015), 52 (2013) 677–685. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.010
- [8] **M.A. Brednikov**, Определение реологических свойств алюминиевых сплавов AMg5 и D16 при высоких скоростях нагружения для математического моделирования сварки трением с перемешиванием. Mag. dis. [Determination of rheological properties of aluminum alloys AMg5 and D16 at high loading rates for mathematical modeling of friction stir welding. Master’s diss.], St. Petersburg, 2017. DOI: 10.18720/SPBPU/2/v17-3364
- [9] **V.G. Barsukov et al.**, Сравнительный анализ модели взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона [Comparative analysis of the models of the relationship between the Siebel and Coulomb friction coefficients], *Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сб. статей международной научно-технической конференции* [New technologies and materials, automation of production: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], BrGTU, Brest (2023) 65–69.
- [10] **A.D. Mikulenko**, Моделирование процесса точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов. Выпускная квалификационная работа бакалавра [Modeling of the process of friction stir spot welding of aluminum alloys. Bachelor’s final qualifying work]. St. Petersburg, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2024/vr/vr24-5244

- [11] **S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao**, Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [11] **K.E. Knipling, R.W. Fonda**, Texture development in the stir zone of near- α titanium friction stir welds, *Scripta Materialia*, 60 (12) (2009) 1097–1110. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.02.050
- [12] **C. Meran**, The joint properties of brass plates by friction stir welding, *Materials & Design*, 27 (9) (2006) 719–726. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.006
- [13] **X.K. Zhu, J.Y. Chao**, Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2) (2004) 263–272. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.025
- [14] **Y.D. Chung, H. Fujii, R. Ueji, N. Tsuji**, Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility, *Scripta Materialia*, 63 (2) (2010) 223–226. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.03.060
- [15] **Z. Kiss, T. Czigány**, Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene, *eXPRESS Polymer Letters*, 6 (1) (2012) 54–62. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.6

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anastasia D. MIKULENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: mikulenko02@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6178-1179>

Evgenii V. PANCHENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: panchenko.ev@edu.spbstu.ru

Mikhail A. OZHEGOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: ozhmik@yandex.ru

Anton A. NAUMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: anton.naumov@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4934-0415>

Поступила: 13.09.2024; Одобрена: 13.10.2024; Принята: 15.10.2024.
Submitted: 13.09.2024; Approved: 13.10.2024; Accepted: 15.10.2024.